

三角度磁巴克豪森测量平面应力方法研究*

郑 阳¹, 周进节², 谭继东¹, 张 鑫^{1,2}

(1. 中国特种设备检测研究院 北京, 100029)

(2. 中北大学机械工程学院 太原, 030051)

摘要 为了提升磁巴克豪森(magnetic Barkhausen noise, 简称 MBN)应力测量效率, 提出了一种三角度磁巴克豪森测量平面应力的方法, 分析了角度选择对精度的影响。为了减小标定的不确定性, 提出了一种基于多维特征重构不确定性度量空间的贝叶斯标定方法。实验结果表明, 当应力大于 50 MPa 时, 采用相互间隔 60° 的 3 个角度, 可实现主应力值测量误差不大于 ±10 MPa、方向测量误差不大于 ±5°。贝叶斯标定模型进一步将幅值误差降低到 ±5 MPa 以下, 并将方向测量的 ±5° 误差带扩展到 40 MPa 的低应力区。该研究方法为工程中采用磁巴克豪森高效、准确测量平面应力奠定了基础。

关键词 平面应力; 磁巴克豪森; 贝叶斯标定模型; 原位测量; 无损检测

中图分类号 TH212; TH213.3

引 言

在制造和服役过程中, 机械构件不可避免地会遇到残余应力、应力超载和应力集中等问题, 影响材料的疲劳强度、抗应力腐蚀性能和结构稳定性等, 降低使用寿命或引发失效风险。因此, 应力测量是制造质量控制和设备安全服役评估的重要技术之一^[1-5]。

根据测量原理, 应力测量的方法可分为有损和无损两大类。有损方法主要包括小孔法、环芯法、剥离法和等高线法。小孔法的最大相对误差约为 10%。在理想条件下, 环芯法的测量精度为 ±15 MPa, 等高线法的测量精度一般为 ±20 MPa^[6]。无损方法一般包括 X 射线衍射法、超声法和磁测法。X 射线衍射法相对成熟且应用广泛, 测量精度为 ±20 MPa, 但存在射线有害、携带不便和检测效率低等问题。超声法是基于声弹性效应^[7], 具有灵敏度高、信号穿透性强和检测过程方便安全等优点^[8], 该方法测量残余应力的一般精度可达 ±30 MPa 左右, 但在检测中易受耦合接触状态的影响而产生较大误差。磁测法主要包括磁巴克豪森噪声法和磁记忆法。其中, 磁巴克豪森应力测量法因具有高灵敏度、高重复性、原位无损、便捷高效和成本低廉等优点, 在残余应力评估、结构承载状态测

评、应力集中与损伤风险预警中应用广泛^[9-10], 且 MBN 技术能够表征由应力、晶体结构或两者共同作用的铁磁材料的磁晶各向异性^[11]。

学者们对 MBN 检测应力的可行性、特征参量、各类场景下与其他方法检测效果比对进行了大量研究。Grijalb 等^[12]研究表明, 试件表面的应力分布与 MBN 信号的分布呈现相同的规律。Wang 等^[13]对钢轨表面应力与不同特征之间的敏感关系进行了研究, 提出了一种具有更高敏感度的峰值与宽度之比的特征, 还研究了温度变化对 MBN 测量钢轨应力的影响, 得到了 MBN 特征值随温度的变化规律^[14]。Vourna 等^[15]对无取向电工钢的残余应力进行了测量, MBN 和 X 射线法得到的应力值具有很好地相关性。文献[16-17]用 MBN 法对焊接钢板的残余应力进行了测量, 分别与 X 射线法和钻孔法进行了对比, 结果具有较高的吻合度。在应力的定量测量方面, Sorsa 等^[18]提出了基于 MBN 数据来定量预测表面硬化钢试样残余应力的方法, 使用经过特征生成、特征选择、模型识别和验证等对残余应力的预测评估效果较好, 该方法对材料的硬度同样具有评估作用。Lasaosa 等^[19]在 Kypris-Jiles 模型的基础上, 增加了磁场衰减对 MBN 的影响来进行残余应力深度剖面的定量估计, 评估深度最高可达 130 μm, 误差小于 70 MPa^[6]。

* 国家自然科学基金资助项目(62071494); 国家市场监督管理总局科技计划资助项目(2021MK172)

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-04-26

MBN法测量应力的研究主要为某个特定方向上正应力与MBN特征量关联关系的研究。应力本身是一种体力,用6个独立的量描述,为二阶张量。由于MBN测量中一般只能获得表层信号,反映的是材料表面极薄层的应力状态,层厚与磁化区域相比非常小,故一般认为其测量的是表层的平面应力状态。Liu等^[20]认为,测量方向对MBN信号的影响是目前MBN法测量应力存在的挑战之一。郑阳等^[4]提出了采用周向磁巴克豪森噪声分布测量平面应力张量的方法,实现了测量点任意方向的正应力和剪应力解调,可得到最大主应力的方向和大小。但是,该方法在实施中需扫描测量周向360°各方向上的磁巴克豪森信号,获得特征分布才能进行解算,在实际工程应用中操作效率低,且当遇到操作空间有限、大曲率管道表面时,较难实施。因此,如何高效测量是MBN法测量平面应力面临的主要问题。考虑到磁晶各向同性材料中各个方向上应力分量对MBN特征值的影响遵守同样的变化规律,且在弹性力学理论上,平面应力状态求解中仅有3个独立的量。理论上能获得3个角度上的正应力,即可实现平面应力张量的完全求解。基于此,笔者提出通过3个角度上的MBN信号来测量平面应力的方法,证明其可行性,并研究如何选择合适的测量角度。

由于MBN应力测量是基于特征值与应力关联关系的间接测量方法,因此标定是测量过程中的关键步骤,直接影响应力测量的准确度和精度,且巴克豪森效应极易受到材料特性、实验操作和环境的影响,从而导致信号本身的随机性^[21-25]。如何降低应力标定过程中的随机性也是本研究的重点。在以往的研究或应用中,大多采用均方根(root mean square,简称RMS)来标定试件的应力。由于MBN信号本身的随机性较大,使用单一特征具有一定的局限性,不能充分体现MBN特征与应力之间的关系^[26]。

为了定量确定MBN信号中的随机性,减少特征分散性,笔者提出了一种不确定性分析和特征重构方法。用多维特征进行应力标定,建立MNB多维特征与应力之间的回归模型,基于贝叶斯标定模型的机器学习方法进行应力预测,以便实现准确标定。多维特征的有效融合可以更全面、准确地描述MBN信号与应力之间的标定关系。

1 理论模型

1.1 最大主应力计算

应力状态作为外部机械载荷的响应,是材料状态的重要信息。目前,平面应力的测量多为点对点旋转,探头只能沿表面的一个方向磁化。为了获得圆周方向的MBN信号,需要旋转探头获取不同方向的信号,因此检测效率较低。在一些研究中,周向信号是通过旋转磁场得到的。由于MBN信号的随机性,激发磁场的不稳定性会导致额外误差,增加分析难度,影响平面应力的测量精度。针对上述问题,笔者提出了三方向测量方法,并研究了测量角度与测量精度之间的关系。

根据经典理论,平面上某一点的应力状态可以描述为

$$\begin{aligned}\sigma_x &= (\sigma_1 - \sigma_2) \cos^2 \theta_1 + \sigma_2 \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) \sin 2\theta_1\end{aligned}\quad (1)$$

其中: σ_1 为最大主应力; σ_2 为最小主应力; θ_1 为 σ_x 与最大主应力 σ_1 之间的夹角。

通过测量3个方向的MBN得到3个已知方向的应力值,利用数值方法和式(1)求解平面内的最大主应力。假设 U' 为最大主应力方向, V' 为最小主应力方向。图1为3个求解角度相对关系示意图。如果测量 $\sigma_{x1'}$ 作为某一个方向,则其与方向 σ_1 的夹角为 θ_1 ,继续测量另外一个方向 $\sigma_{x2'}$,其与方向 σ_1 的夹角为 $\theta_1 + \varphi_1$,同时 $\sigma_{x3'}$ 与方向 σ_1 的夹角为 $\theta_1 + \varphi_2$ 。此时式(1)可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_{x1'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos^2 \theta_1 + \sigma_2 \\ \sigma_{x2'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos^2 (\theta_1 + \varphi_1) + \sigma_2 \\ \sigma_{x3'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos^2 (\theta_1 + \varphi_2) + \sigma_2 \end{cases}\quad (2)$$

式(2)包含3个未知数 σ_1 、 σ_2 和 θ_1 ,均可通过求解

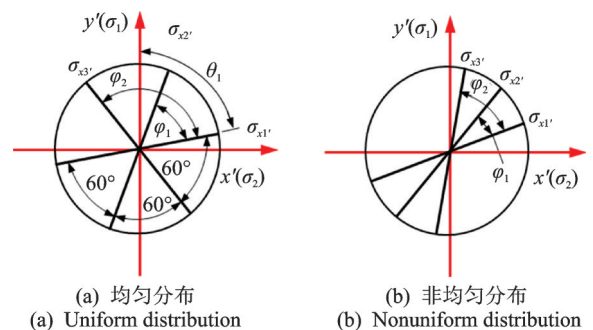


图1 3个求解角度相对关系示意图

Fig.1 The relative relationship diagram of three solving directions

式(1)得到。由于 σ_{x_1} 的方向已知,所以可以依次求出最大主应力的方向。

平面内最大主应力的求解过程^[27]具体为:①对待试样进行标定,得到材料弹性范围内应力与MBN之间的标定曲线;②测量3个方向的MBN信号,通过校准曲线得到3个方向的应力值;③将3个方向的应力值及其夹角关系代入式(2),得到平面内最大主应力的方向和大小。

1.2 贝叶斯标定模型

贝叶斯标定模型是一种机器学习模型,通过描述观测结果和模型本身的不确定性来提高方法的精度。采用数据驱动的方法对该模型进行训练,将训练后的模型用于应力状态预测。不同于传统的数据点拟合方法的标定过程,该方法能较好地实现多参数融合。

采用基于贝叶斯学习和变分推理的神经网络结构变分自编码器对观测不确定性进行分析。以概率的方式观察和描述数据的隐藏空间,通过编码和解码2个训练过程对数据进行压缩和重构,实现样本的特征提取和参数重构。

首先,将原始特征样本空间表示为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$,并根据 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 得到概率分布 $p(X)$ 。

其次,利用随机样本重构特征样本空间。一般来说,计算比较困难,可以表示为

$$p(X) = \sum_Z p(X|Z)p(Z) \quad (3)$$

其中: $p(X|Z)$ 为一个用 Z 来生成 X 的模型。

假设 Z 服从标准正态分布,在此基础上,需要训练一个概率模型解编码器 $\hat{X} = g(Z)$,并从 $p(Z|X_k)$ 抽样中获得 Z_k ,重新计算 X_k 。 $p(Z|X_k)$ 的均值和方差根据 $\mu_k = f_1(X_k)$, $\log \sigma^2 = f_2(X_k)$ 的神经网络计算。为了与应力计算和贝叶斯估计中常用的符号一致,这里使用了一些相同的符号,用下标来区分。

然后,从 $p(Z|X_k)$ 抽样中得到 Z_k ,通过生成器得到 $\hat{X}_k = g(Z_k)$ 。

最后,通过最小化 $D(\hat{X}_k, X)^2$ 迭代更新参数。

根据变分自编码器的学习隐藏变量 Z 的概率分布(特征样本空间),在输入数据 X 给定的情况下,变分自编码器的推理网络的输出为 Z 类型的后验分布。基于变分推理的思想,可以使用另一种分布 $q(Z|X)$ 近似成 $p(Z|X)$ 。 $q(Z|X)$ 的参数通过深度学习,并逐步优化 q ,使之非常近似于 $p(Z|X)$,从

而用于复杂分布的近似推理。

为了使这两个分布 q 和 p 尽可能相似,可以最小化两个分布之间的Kullback Leibler(简称KL)散度,即两个分布之间的距离。KL散度值越小,两者越接近;值越大,差值越大。 $X = \{x^{(i)}\}_{i=1}^N$ 为包含 N 个连续或离散样本的数据集 x 。假设所有的数据(特征)都是独立的、同分布的,两个观测值互不影响。需要估计 $p(x|z)$ 的所有参数,使用对数极大似然法

$$\log p(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)}) = \sum_{i=1}^N \log p(x^{(i)}) \quad (4)$$

基于KL散度,利用分布 $q_\phi(z|x^{(i)})$ 来近似真实后验概率 $p_\theta(z|x^{(i)})$,即

$$\begin{aligned} \text{KL}(q_\phi(z|x^{(i)})||p_\theta(z|x^{(i)})) &= E_{q_\phi(z|x^{(i)})} \log \frac{q_\phi(z|x^{(i)})}{p_\theta(z|x^{(i)})} = \\ &= E_{q_\phi(z|x^{(i)})} \log \frac{q_\phi(z|x^{(i)})p_\theta(x^{(i)})}{p_\theta(z|x^{(i)})p_\theta(x^{(i)})} = \\ &= E_{q_\phi(z|x^{(i)})} \log \frac{q_\phi(z|x^{(i)})}{p_\theta(z, x^{(i)})} + E_{q_\phi(z|x^{(i)})} \log p_\theta(x^{(i)}) = \\ &= E_{q_\phi(z|x^{(i)})} (\log q_\phi(z|x^{(i)}) - \log p_\theta(z, x^{(i)})) + \\ &= \log p_\theta(x^{(i)}) \end{aligned} \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} L(\theta, \phi; x^{(i)}) &= E_{q_\phi(z|x^{(i)})} (-\log q_\phi(z|x^{(i)}) + \\ &= \log p_\theta(z, x^{(i)})) = -D_{\text{KL}}(q_\phi(z|x^{(i)})||p_\theta(z)) + \\ &= E_{q_\phi(z|x^{(i)})} \log p_\theta(x^{(i)}|z) \end{aligned} \quad (6)$$

被称为似然函数的变分下界,得到

$$\log p_\theta(x^{(i)}) = L(\theta, \phi; x^{(i)}) + \text{KL}(q_\phi(z|x^{(i)})||p_\theta(z|x^{(i)})) \quad (7)$$

一般情况下,求其下边界 $L(\theta, \phi; x^{(i)})$,通过蒙特卡罗方法来估计期望

$$\begin{aligned} E_{q_\phi(z|x^{(i)})} [f(z)] &= \\ E_{p(\epsilon)} [f(g_\phi(\epsilon, x^{(i)}))] &\simeq \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L f(g_\phi(\epsilon^{(i)}, x^{(i)})) \end{aligned} \quad (8)$$

在实际实验中,如果样本量较大,一般采用小批处理方法进行学习,通过小批处理可以估计出对数似然函数的下界

$$L(\theta, \phi; X) \simeq L^M(\theta, \phi; X^M) = \frac{N}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{L}(\theta, \phi; x^{(i)}) \quad (9)$$

根据特征概率分布空间重构出3个不同的特征样本空间。具体过程如下:①提取MBN特征,构建原始特征样本空间 X ;②基于变分自编码器计算整个应力状态下原始特征样本空间 X 的特征概率分布

空间 P ; ③基于 P 重构原始特征样本空间 X , 得到 3 个重构特征样本空间 X_{s1}, X_{s2} 和 X_{s3} , 分别对应 3 个不同的特征重建区间; ④将原始特征样本空间 X 以及 3 个重构特征样本空间 X_{s1}, X_{s2} 和 X_{s3} 输入到预测模型中, 通过比较得到区间指标, 以此作为 MBN 不确定度的度量; ⑤为了消除随机性的影响, 选取区间指标, 在 MBN 中加入有序量化噪声。

2 实验

2.1 实验平台搭建

试件选用工程中常用 Q235, 试件的长 \times 宽 \times 厚为 $340 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。拉伸前, 将试件在炉膛内加热至 550°C , 冷却 5 h , 通过热处理消除残余应力。试件经除锈剂处理后, 再用酸蚀法去除表面氧化层, 确保初始阶段处于无应力状态。采用砂纸对试件表面进行打磨, 以消除加工残余塑性变形对实验结果的影响。

该实验系统由信号发生器、功率放大器、前置放大器、数据采集器和上位机模块组成。传感器是自行研制的 U 型轭式 MBN 传感器, 由 U 型轭和采集线圈组成。U 型轭由包有漆包线的硅钢片制成, 采集线圈由包有漆包线的铁氧体铁芯制成, 可以对铁磁性材料进行磁化, 接收 MBN 信号。图 2 为实验系统示意图。

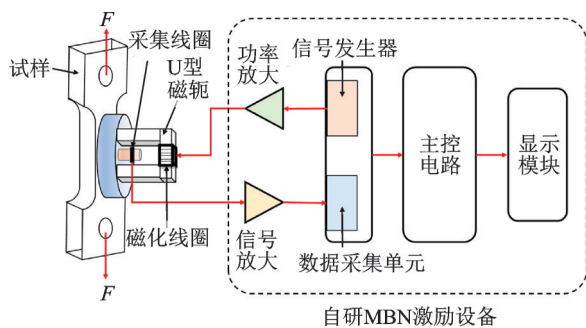
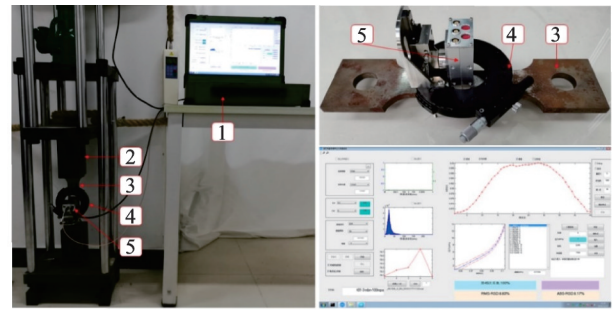


图 2 实验系统示意图

Fig.2 Schematic of the experimental system

在这个系统中, 计算机控制信号发生器产生一个频率为 50 Hz 的正弦激励信号, 通过功率放大器放大, 最后作用于传感器的励磁线圈, 产生交变磁场磁化试样, 材料在重复磁化过程中产生 MBN 信号。原始 MBN 信号由接收线圈接收, 经前置放大器放大后, 再由计算机采集。信号发生器输出的原始信号峰值为 0.097 V , 功放的增益为 20 dB , 前置功放的增益为 40 dB , 采样频率为 0.5 MHz 。周向应力测量装置如图 3 所示。



1-MBN测试仪器; 2-拉伸机; 3-试样; 4-周向测量夹具; 5-MBN传感器

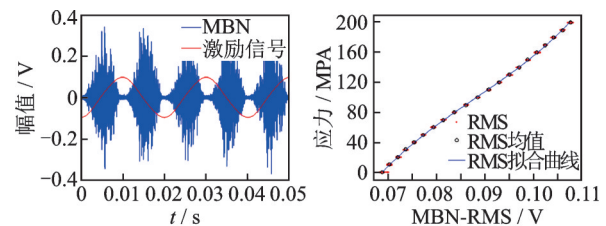
图 3 周向应力测量装置

Fig.3 Tensile test for measurement of the circumferential stress

图 4 为测量和标定结果。图 4(a) 为无应力状态下带通滤波后的 MBN 信号, 这里只显示了 5 个波包。均方根值作为 MBN 信号的一个特征来标定应力。实际上, RMS 计算中使用了 1000 个 MBN 波包。RMS 值的计算公式为

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i^2} \quad (10)$$

其中: L_i 为 MBN 信号的数据点。



(a) 滤波后的 MBN 信号 (b) MBN 均方根值与应力的标定曲线
(a) Filtered MBN signal (b) Calibration curve of stress and MBN-RMS

图 4 测量和标定结果

Fig.4 Measurement and calibration result

在 RMS 计算中确定 MBN 波包的数量时, 需要考虑在少量 MBN 波包情况下仍能获得稳定 RMS 值的能力, 以获得较高的检测效率, 即在使用机器学习方法的时候, 会遇到小样本和不确定性的问题。

2.2 应力标定曲线测量

本研究通过拉伸实验标定了 Q235 的 MBN 特征与应力之间的对应关系。在小型拉伸机上, 在不同拉伸载荷下测量拉伸方向的 MBN 信号。拉伸过程控制在弹性变形范围内, 加载范围为 $0 \sim 200 \text{ MPa}$, 测量间隔为 10 MPa 。为保证拉伸测量时标定数据的准确性, 在相同的拉伸载荷下进行 5 次测量, 取平均值作为 MBN 信号。重复拉伸载荷 5 次, 将

5次拉伸过程的平均结果作为最终的校准数据。

MBN均方根值与应力的标定曲线如图4(b)所示。拟合曲线的表达式为

$$W = 2\,071\,362.717I^3 - 546\,362.693I^2 + 52\,411.771I - 1\,694.242 \quad (11)$$

根据图4可知,MBN-RMS与正应力单调相关,且曲线并非严格线性。由于其单调性,RMS与应力之间的一一映射关系仍可通过拟合得到,因此正应力的幅度可以从RMS中获得。MBN-RMS在正应力从0 MPa变化到200 MPa时,应力测量中的校准误差从68.9 mV变化到107.8 mV。在每一阶段的测量中,测得的RMS最大变化为1.9 mV且发生在0 MPa的应力下;最小变化为0.8 mV,出现在110 MPa的应力下,对应应力标定的最大误差为13 MPa,最小误差为3.6 MPa。

为了提高信号特征的鲁棒性,最大化融合效果,笔者基于贝叶斯概率分析的不确定性和敏感性方法,对MBN信号本身的随机性进行建模,用于应力与MBN信号之间的标定。采用更高效的机器学习模型,建立MBN信号的多维特征与不同方向应力之间的映射关系。与确定性应力标定曲线不同,概率模型标定方法考虑模型参数不确定性分布的影响,进而预测应力目标函数的分布。现有的概率方法为表征上述不确定性提供了理论基础。基于现有的知识、经验或数据,给出模型参数的先验分布,可以利用贝叶斯推理进行更精确的应力标定。解释和表征应力标定模型中的不确定性,有助于判断预测应力值的置信区间,以及估计其他重要参数。

为了验证巴克豪森信号不确定性分析的有效性,特别是小样本问题,将单个波包从连续的巴克豪森信号中分离出来,形成更多的样本,并提取12个特征形成特征矩阵。不同的应力状态被用作数据集的标签,从而得到一个重构的特征空间。为了比较重构空间在度量不确定性方面的优势,采用通用回归模型比较重构前后的情况,也可以比较模型的预测效果。笔者使用多元线性回归(multiple linear regression,简称MLR)和多层感知器(multilayer perceptron,简称MLP)2个模型,使用4种类型的特征作为输入来比较结果。

表1为不同特征空间下不同回归模型的指数对比。其中: X_{org} 为原始特征空间中的12维特征; X_{rec} 为重构空间中的12维特征。图5为原始和重构特征空间下的多元线性回归和多层感知机的模型预测对比。表1分别比较了原始空间和重建空间中的

表1 不同特征空间下不同回归模型的指数对比

Tab.1 Comparison of two indicators for different feature space by using two regression models

特征空间	回归模型	RMSE		R^2	
		MLR/MLP	MLR/MLP	MLR/MLP	MLR/MLP
X_{org}	MLR/MLP	10.024 1 / 9.505 5	0.973 2 / 0.974 7		
X_{rec}	MLR/MLP	6.101 3 / 1.624 4	0.989 7 / 0.999 2		
RMS_{org}	MLR/MLP	9.750 7 / 9.447 1	0.972 6 / 0.976 6		
RMS_{rec}	MLR/MLP	9.621 8 / 9.445 2	0.974 1 / 0.976 7		

RMS特征,将样本分为训练集、验证集和测试集,通过交叉验证(cross validation,简称CV)进行验证。均方根误差(root mean square error,简称RMSE)和 R^2 这2个常用指标分别从均值和方差的角度表示预测结果的不确定性。这2个指标的计算结果与图5一致,显示了4个不同的特征(X_{org} , X_{rec} , RMS_{org} 和 RMS_{rec})以及2个回归模型之间的对比。

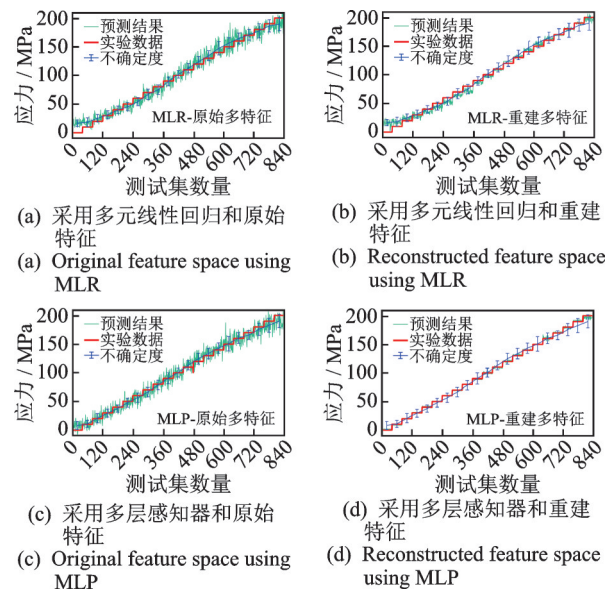


图5 不同特征空间下的模型预测对比

Fig.5 Prediction comparison of different feature spaces and models

图5中,每个应力状态通过40个测试集进行比较,从0~200 MPa,间隔为10 MPa。可以看出:①重构特征的不确定性较小;②虽然使用了多维特征,但在原始特征空间中具有相似的效果,并解释了RMS在大多数情况下都有效;③MLR和MLP为简单的回归模型,具有相似的性能,但MLP表现出的不确定性较小。这里将研究限定在观测的不确定性,即特征的不确定性。通过重参数化采样方法,可以表征、度量和降低MBN信号的不确定性,即使用多特征进行应力标定的机器学习模型。在

随后的应力标定过程中,选择经过训练的 MLP 模型,通过使用重建空间中的所有 12 维特征输入来预测应力。

2.3 平面应力测量

单轴拉伸时,采用拉伸试样中心点最大主应力来验证基于三方向 MBN 选择的平面内最大主应力的求解方法。由于实验的试样只受到一个方向的拉应力,因此参考该拉应力来确定试样上测量区域的平面应力张量,不需要使用其他测量方法。在拉伸实验过程中的每个应力状态下,测量周向 MBN 信号的分布,如图 6 所示。测量从 0° 位置开始,按照图 6 所示的旋转方向以 5° 间隔进行到 180° 位置。由于 U 型轭的对称性,从 180° 到 360° 是通过 0° 到 180° 的测量结果获得的。最大主应力方向为 90° (270°),与拉伸方向一致。最大主应力是通过选择几组不同角度的 MBN 信号求解获的。接下来,笔者将验证起始角度的选择以及 3 个方向之间的夹角与平面应力的影响规律。

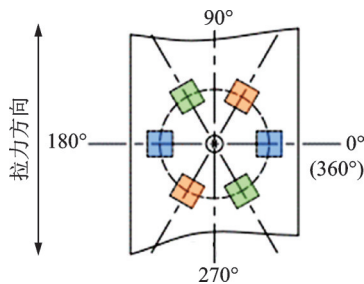


图 6 周向 MBN 信号测量示意图

Fig.6 Diagram of circumferential MBN measurement

3 结果与讨论

为了验证该方法的可行性,在不同应力状态下,选取 30° 、 90° 和 150° 这 3 个方向的 MBN 信号,并将相应的 RMS 值代入标定曲线,得到应力值,使用式(2)求解最大主应力。常规标定曲线下的应力求解结果如表 2 所示。可以发现,当应力值较小时,最大主应力的方向误差较大。这是因为当应力很小时,磁各向异性也很小。同时也可看出,虽然最大主应力在低应力状态下的最大误差仅为 11 MPa,但与高应力状态相比,误差也很大。除上述原因外,还受 MBN 仪器系统误差以及标定曲线误差 ± 10 MPa 的影响。因此,在低应力状态下,结果误差相对较大。以上结论可以从磁晶和应力各向异性的角度来解释:当材料本身占主导地位时,磁晶各向异性主要表现在低

表 2 常规标定曲线下的应力求解结果

Tab.2 Verification of stress solution method using conventional calibration curve

应力/ MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_1 幅值误 差 /MPa	σ_1 方向误 差 /($^\circ$)
10	21	13	11	51
20	24	17	4	25
30	34	16	4	8
40	41	19	1	7
50	52	21	2	4
60	64	21	4	5
70	74	22	4	4
80	82	27	2	3
90	93	28	3	2
100	104	29	4	1
110	114	33	4	2
120	123	32	3	0
130	132	32	2	0
140	142	32	2	1
150	152	32	2	1
160	163	30	3	1
170	175	33	5	5
180	178	32	2	3
190	189	28	1	2
200	202	28	2	5

应力状态;随着应力增加,应力各向异性成为影响易磁化轴方向的主要因素。当应力较高时,易磁化轴方向就是应力的方向,当应力大于 50 MPa 时,最大主应力的大小和方向误差大大减小,最大幅值误差为 5 MPa,最大方向误差为 5° ,且随着应力的增加,求解误差相对稳定。最小主应力值的结果如表 2 所示,其误差较大,最大值为 33 MPa。但是,实践中只涉及最大主应力,而没有特别注意最小主应力,因此这里不再考虑。

表 3 为贝叶斯标定模型下的应力求解结果,获得了相同的误差。可以看出,贝叶斯标定模型可以减小幅值和方向的误差,特别是在低应力状态下。

进一步研究了 3 个方向的相对关系,并在整个平面上进行测量,即当 3 个方向之间的角度保持不变时,研究起始角度对最大主应力结果的影响。图 1 显示了 3 个求解方向的相对关系,用 2 种情况说明均匀分布和非均匀分布。图 7 为不同加载情况下应力值的周向分布对比。应力在 10, 20, 30, 50, 80, 120, 150 和 180 MPa 沿 90° 和 270° 拉伸方向的周向分布,并在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内进行测试。理论值即

表 3 贝叶斯标定模型下的应力求解结果

Tab.3 Verification of stress solution method using Bayes-Calibration model

应力/ MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_1 幅值误 差/MPa	σ_1 方向误 差 /($^\circ$)
10	10	1	1	22
20	18	2	2	20
30	28	2	2	8
40	39	5	1	1
50	49	9	1	4
60	59	11	1	1
70	67	17	3	3
80	73	19	7	2
90	84	24	6	1
100	98	23	2	1
110	108	25	2	2
120	115	28	5	0
130	126	30	4	0
140	134	30	6	1
150	152	30	2	1
160	159	33	1	1
170	170	40	0	3
180	174	41	6	2
190	185	40	5	2
200	200	41	0	6

为经典平面应力分布的理论结果;RMS为使用常规标定曲线的MBN单一特征;原始特征为使用贝叶斯标定模型得到的MBN多特征;重构特征也是由贝叶斯标定模型得到,并使用特征重建方法提高特征的鲁棒性。从图7可以看出,MBN通过标定测量的圆周应力与理论值一致,尤其是在高应力状态

下。因此,无论是标定曲线还是标定模型、单一特征还是多维特征,都证明了该测量方法的有效性。然而,在低应力状态下,由于材料的残余应力和各向异性,传统测量结果的不确定性较大。贝叶斯标定模型重建的多特征方法表现出更好的回归效应,降低了10,20和30 MPa的不确定性,即贝叶斯标定模型的误差比传统标定误差小,在最大主应力求解过程中会进一步定量分析。

3.1 非均匀分布夹角的结果

角度分布不均匀时, φ_1, φ_2 会有很多情况,选择 50° 和 $100^\circ, 40^\circ$ 和 $80^\circ, 30^\circ$ 和 60° 这3组进行研究。可以发现,即使应力值较大(≥ 50 MPa),当3个方向不均匀时,最大主应力的误差也很大,当 φ_2 为 100° 时, φ_1 为 50° ,最大误差为36 MPa。随着 φ_1, φ_2 变小,最大主应力的幅值误差变大,最大达到110 MPa,且最大主应力的方向误差也增大。这是由于随着 φ_1 和 φ_2 的减小,尤其是当3个已知方向接近或等于 0° 时,应力分布信息会变少。可见,3个方向的非均匀分布不适合求解最大主应力。

3.2 均匀分布夹角的结果

不同标定方法对比的不同夹角下应力误差分布如图8所示。3个方向均匀分布, φ_1, φ_2 分别为 60° 和 120° 。可以发现,当应力值较大(≥ 50 MPa)时,最大主应力的幅值误差最大为20 MPa,最大方向误差为 10° 。当使用 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 作为3组测量方向时,最大主应力的误差最大。这是因为已知的应力方向垂直于最大主应力方向(90°),这会引入更多不相关

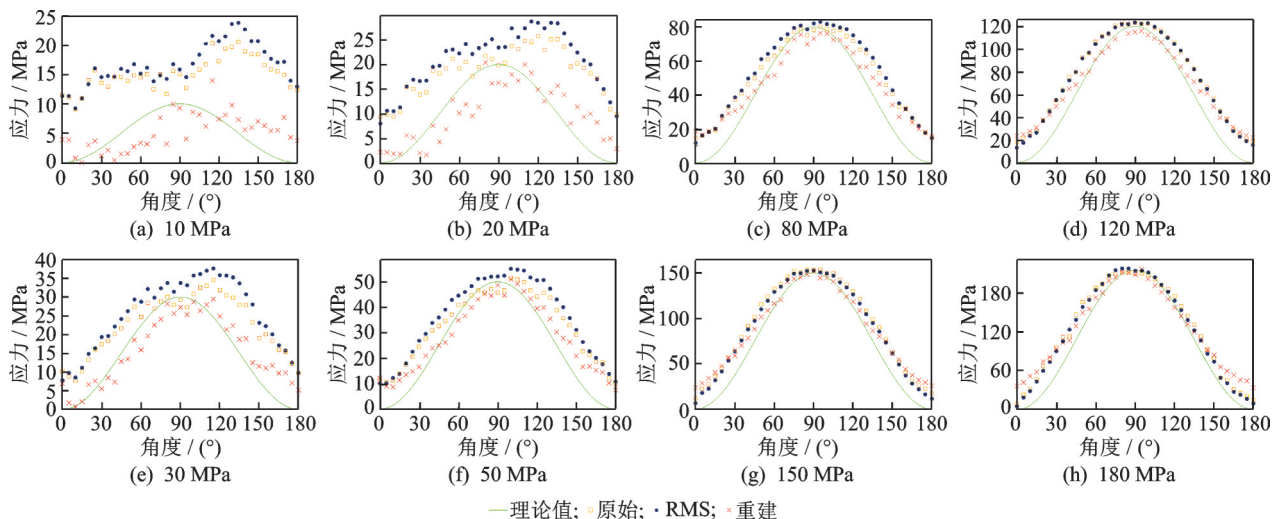


图 7 不同加载情况下应力值的周向分布对比

Fig.7 Circumferential distribution of stress under different load compared

信息。实际上,使用的3个方向将不可避免地包含垂直于最大主应力的方向。因此,当3个方向均匀分布时,最大主应力幅值误差在 20 MPa 以内,方向误差在 10° 以内。

3.3 标定精度对平面应力状态估计的提升

根据贝叶斯标定方法,使用重建特征表征应力状态。与单一特征均方根值相比,当起始角度不同时,重建特征在 0~200 MPa 几乎所有应力状态下具有较小的误差带。本节仅在均匀分布情况下做了测试,进一步证实了均匀分布可以更好地求解平面应力,特别是在低应力情况下,所有重建特征误差小于单一特征误差。这与文献[28]一致,即角度对各向异性的影响分为 2 个阶段:①以 0~85.2 MPa 的磁晶各向异性为主;②以 85.2~213 MPa 的应力各向异性为主。通过机器学习模型得出同样的结论:材料在低应力状态下的原始状态可能存在差异。图 8(d) 为最大主应力方向误差,单一特征和重建特征几乎具有相同的误差带,但重建特征在低应力状态下具有更好的性能。通过图 8 可以看出,幅值误差带可以从 20 MPa 降低到 10 MPa,方向误差带可以从 50 MPa 拓展到 40 MPa。低应力状态的精度可以反映样本的原始差异,特别是在磁各向异性的情况下。只有消除磁各向异性的影响,才能反映出真实的应力状态。

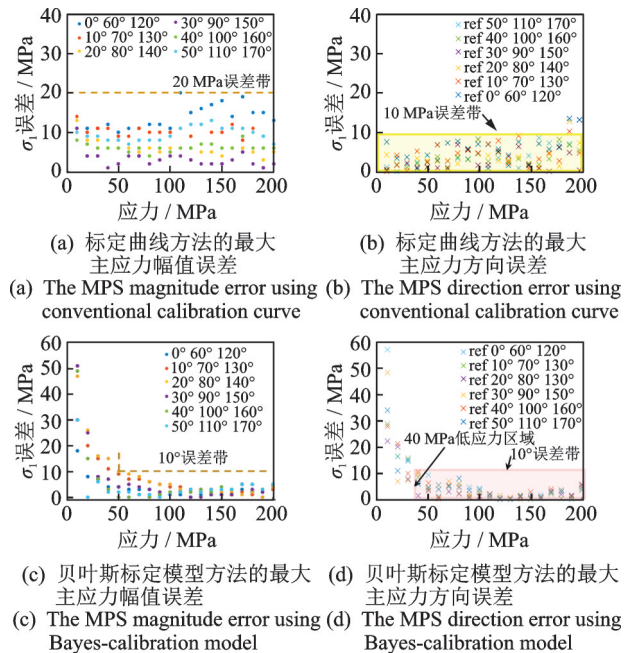


图 8 不同标定方法对比的不同夹角下应力误差分布
Fig.8 Stress error distribution under different included angles compared with different calibration methods

3.4 误差分析

由上述分析可知,笔者提出的求解方法最适合的求解方式是均匀分布,而贝叶斯标定模型可以有效地降低不确定性。

对 6 组不同的求解方向组合进行求解误差的理论分析。在 50, 100, 150 和 200 MPa 的应力下,对每组 3 个求解方向在理论应力值的基础上,分别在 1 个方向、2 个方向、3 个方向人为地引入 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa 的误差,来评估求解误差情况。图 9 为不同应力状态下的应力误差。

从图 9 可以看出,1 个方向和 3 个方向引入 10 MPa, 20 MPa 和 30 MPa 的误差,会给求解的最大主应力带来最大 10 MPa, 20 MPa 和 30 MPa 的误差,而 2 个方向引入 10 MPa, 20 MPa 和 30 MPa 的误差,则会给求解的最大主应力带来最大 13 MPa, 27 MPa 和 40 MPa 的误差,且误差不会随着载荷应力的变化而变化。即若测量系统、标定曲线本身存在 10 MPa, 20 MPa 或 30 MPa 的误差,会给求解的最大主应力带来最大 13 MPa, 27 MPa 或 40 MPa 的误差。计算可知,若用于求解的 3 个已知应力存在一定的误差,则会造成求解结果的最大误差为已知误差的 130%~135%。此外,在求解的最大主应力方向上,3 个方向引入相同误差,不会造成求解的最大主应力的方向误差,而 1 个或 2 个方向引入

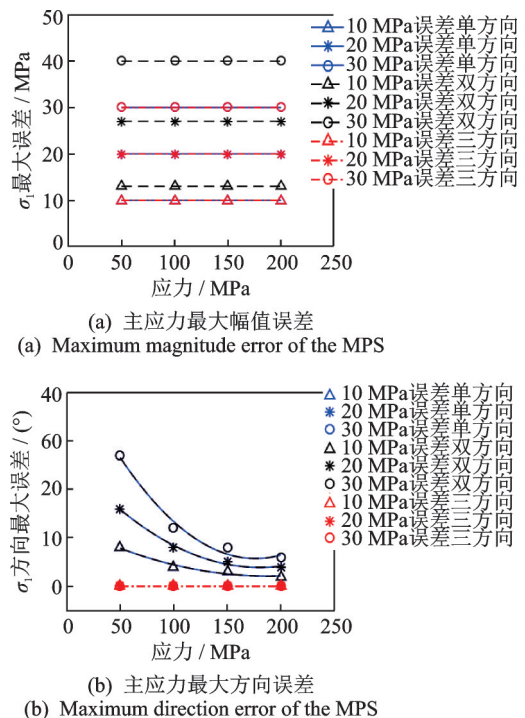


图 9 不同应力状态下的应力误差
Fig.9 Theoretical error under different stress states

10 MPa, 20 MPa 和 30 MPa 的误差,会导致求解的最大主应力的最大方向误差相同,且随着载荷应力的增加而减少,规律性较强。

4 结束语

针对磁巴克豪森测量平面应力工程应用中存在的测量效率和精度的2个关键问题,提出了一种三角度磁巴克豪森测量平面应力方法和一种贝叶斯标定模型方法。与传统周向 MBN 分布法 360° 旋转探头测量相比,三角度法只需测量3个角度 MBN 信号,极大地提高了测量效率和工程可实施性。为了克服标定不确定性,特别是在低应力状态下,比较了使用贝叶斯定理和变分推断的标定方法,表明贝叶斯标定模型可以进一步减小幅度误差,将方向误差带扩展到低载荷区域。

实验证明了三角度磁巴克豪森法测量平面应力的有效性。当3个测量方向应均匀分布,即相互间呈 60° 角时,求解结果稳定,误差最小,可实现主应力值测量误差不大于 ±10 MPa、方向测量误差不大于 ±5°。实验表明,标定过程对测量结果有很大影响。原始 MBN-RMS 应力标定曲线的最大误差为 ±6.5 MPa,可能造成的最大误差为 ±9 MPa。通过建立重构空间来克服点估计问题,贝叶斯标定模型得到的回归 R^2 为 0.999 2,实现了更高的标定精度,可以进一步将幅值误差降低到 ±5 MPa 以下,并将方向测量的 ±5° 误差带扩展到 40 MPa 的低应力区。

参 考 文 献

- [1] 朱林,陈敏,贾民平. 基于贝叶斯理论的结构件健康状态评估方法研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 59-63.
ZHU Lin, CHEN Min, JIA Minping. Research on health status assessment method of structural components based on Bayesian theory [J]. *Vibration and Impact*, 2020, 39(6): 59-63. (in Chinese)
- [2] 程志远,宋凯,董世运,等. 基于 MBN 法的应力检测参数优化及试验[J]. 无损检测, 2018, 40(4): 13-18.
CHENG Zhiyuan, SONG Kai, DONG Shiyun, et al. Optimization and test of stress detection parameters based on MBN method [J]. *Nondestructive Testing*, 2018, 40(4): 13-18. (in Chinese)
- [3] 朱林,贾民平,林明智,等. 融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构健康评估方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 21-27.
ZHU Lin, JIA Minping, LIN Mingzhi, et al. Structural health assessment method integrating stress concentration factor and Bayesian theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(24): 21-27. (in Chinese)
- [4] 郑阳,张鑫,周进节,等. 周向磁巴克豪森噪声分布及平面应力测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 75-87.
ZHENG Yang, ZHANG Xin, ZHOU Jinjie, et al. Circumferential magnetic Barkhausen noise distribution and plane stress measurement [J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 42(6): 75-87. (in Chinese)
- [5] 梁天佑,尹爱军,陈平,等. 物理模型与高斯过程融合驱动的残余应力疲劳状态评估[J]. 振动与冲击, 2022, 40(2): 224-228.
LIANG Tianyou, YIN Aijun, CHEN Pin, et al. Residual stress fatigue state evaluation driven by the fusion of physical model and Gaussian process [J]. *Vibration and Impact*, 2022, 40(2): 224-228. (in Chinese)
- [6] GUO J, FU H, PAN B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: a review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 34(2): 54-78.
- [7] HUGHES D S, KELLY J L. Second-order elastic deformation of solids [J]. *Physical Review*, 1953, 92: 1145-1149.
- [8] JIN C, LU C, SHI Y W, et al. Study on relationship between critically refracted longitudinal wave and internal stress in pre-stretched aluminum alloy plate [J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(1): 14-19.
- [9] SALEEM A, UNDERHILL P R, FARRELL S P, et al. Magnetic barkhausen noise measurements to assess temper embrittlement in HY-80 steels [J]. *Journal of Technology & Science*, 2020, 56(3): 1-8.
- [10] SANTA-AHO S, SORSA A, HONKANEN M, et al. Detailed Barkhausen noise and microscopy characterization of Jominy end-quench test sample of CF53 steel [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(11): 4896-4909.
- [11] QIU F S, JOVIČEVIĆ-KLUG M, TIAN G Y, et al. Correlation of magnetic field and stress-induced magnetic domain reorientation with Barkhausen noise [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 523: 167588.
- [12] GRIJALB F A F, PADOVESE L R. Non-destructive scanning for applied stress by the continuous magnetic Barkhausen noise method [J]. *Journal of Magnetism*

- and Magnetic Materials, 2018, 446: 231-238.
- [13] WANG P, GAO Y L, YANG Y R, et al. Experimental studies and new feature extractions of MBN for stress measurement on rail tracks [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49: 4858-4864.
- [14] WANG P, JI X, YAN X, et al. Investigation of temperature effect of stress detection based on Barkhausen noise [J]. Sensors and Actuators a Physical, 2013, 194: 232-239.
- [15] VOURNA P, KTENA A, HRISTOFOROU E. Residual stress analysis in nonoriented electrical steel sheets by barkhausen noise measurements [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50: 6200204.
- [16] VOURNA P, KTENA A, TSAKIRIDIS P E, et al. A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels [J]. NDT & E International, 2015, 71: 33-42.
- [17] YELBAY H I, CAM I, GUR C H. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by magnetic barkhausen noise technique [J]. NDT & E International, 2010, 43(1): 29-33.
- [18] SORSA A, LEIVISK K, SANTA-AHO S, et al. Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement [J]. NDT & E International, 2012, 46: 100-106.
- [19] LASAOSA A, GURRUCHAGA K, ARIZTI F, et al. Quantitative estimation of nonmonotonic residual stress depth-profiles using an extended Kypris-Jiles model of the magnetic Barkhausen noise spectrum [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(3): 033904.
- [20] LIU X, DONG H. Quantitative evaluation of residual stress and surface hardness in deep drawn parts based on magnetic Barkhausen noise technology [J]. Measurement, 2020, 168: 108473.
- [21] DOBMANN G, THEINER W A, BECKER R. Progress in the micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis (3MA) [J]. NDT & E International, 1996, 29(5): 330-339.
- [22] ALTPETER I, DOBMANN G, KROENING M, et al. Micro-magnetic evaluation of micro residual stresses of the IInd and IIIrd orders [J]. NDT & E International, 2009, 42(4): 283-290.
- [23] ALTPETER I, DOBMANN G, KATERBAU K H, et al. Copper precipitates in 15 NiCuMoNb 5 (WB 36) steel: material properties and microstructure, atomistic simulation, and micro-magnetic NDE techniques [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 206 (2/3) : 337-350.
- [24] CIKALOVA U, SCHREIBER J, HILLMANN S, et al. Auto-calibration principles for two-dimensional residual stress measurements by Barkhausen noise technique [J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1581: 1243-1247.
- [25] KYPRIS O, NLEBEDIM I C, JILES D C. Mapping stress as a function of depth at the surface of steel structures using a frequency dependent magnetic barkhausen noise technique [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4428-4431.
- [26] HOU Y T, LI X, ZHENG Y, et al. A method for detecting the randomness of Barkhausen noise in a material fatigue test using sensitivity and uncertainty analysis [J]. Sensors, 2020, 20(18): 5383-5383.
- [27] 张鑫, 谭继东, 朱雨虹, 等. 磁巴克豪森噪声表征铁磁性材料应力的最优特征值研究 [J]. 传感技术学报, 2020, 33(9): 1240-1245.
ZHANG Xin, TAN Jidong, ZHU Yuhong, et al. Study on the optimal feature of magnetic Barkhausen noise to characterize stress in ferromagnetic materials [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(9): 1240-1245. (in Chinese)
- [28] CAPÓ-SÁNCHEZ J, PÉREZ-BENITEZ J, PADOVESE L R. Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise [J]. NDT & E International, 2007, 40(2): 168-172.



第一作者简介: 郑阳, 男, 1984年11月生, 博士、研究员。现工作于中国特种设备检测研究院, 任无损检测领域首席研究员, 主要研究方向为电磁学、铁磁学、声学及其交叉领域的无损检测理论、仪器、方法和标准。

E-mail: zhengyangchina@126.com